La fusion nucléaire : Des étoiles au projet ITER : comment la fusion nucléaire est l'origine et l'avenir de la vie sur Terre ?

1. La fusion
A/Définition
La fusion nucléaire à l'origine de l'énergie solaire est proposée comme hypothèse depuis les années 1920. Depuis,ses mécanismes ont été décrits en détail et quantifiés. Elle est la plus grande aventure scientifique et technologique en cours, puisqu'elle pourrait devenir la principale source d'énergie sur Terre.
La fusion nucléaire consiste en l'association de 2 noyaux légers pour former un nouveau noyau plus lourd et libère de l'énergie. Cette réaction de fusion est actuellement notre principale source d'énergie puisqu'elle est au cœur du fonctionnement des étoiles et de notre soleil.

B/Formation et vie d'une étoile.
La fusion nucléaire est en quelque sorte au cœur de la vie de l'étoile de sa naissance à sa mort.
À la naissance de l'univers il y a 13 milliards d'années, il est essentiellement composé d'hydrogène et d'hélium, et sa température est de plusieurs millions de degrés. À ce stade, les protons et les électrons ne sont pas liés. Le Big-Bang engendre l'expansion de l'univers, ce qui permet un refroidissement et en quelques centaines de milliers d'années la température atteint 5000 degrés, les électrons et les protons se lient pour former la structure de l'hydrogène et de l'hélium.

D'immenses nuages de gaz très denses forment des galaxies.

Au sein des galaxies des étoiles se forment à partir de masses de gaz qui s'effondrent sous l'effet de leur propre gravité. Initialement, cette étoile est donc une masse d'hydrogène essentiellement et d'hélium. L'immense pression au sein de l'étoile liée à sa propre gravité chauffe l'hydrogène.
Ces conditions de pression et de température vont permettre aux noyaux d'hydrogène de commencer à fusionner, et de former des atomes d'hélium. L'énergie libérée par cette fusion va entretenir les conditions de température et de pression. Notamment deux forces contraires luttent : la gravité qui contracte l'étoile et l'énergie libérée par la fusion qui dilate l'étoile.
Les conditions initiales de pression et température par la gravité permettent l'initiation de la fusion. L'énergie libérée par cette fusion va entretenir ces conditions de pression et température pour fusionner la totalité de l'hydrogène.
Pendant 95% de sa vie l'étoile va ainsi transformer l'hydrogène en hélium, c'est ce qu'on appelle sa séquence principale.

Une étoile comme le soleil fusionne environ 600 millions de tonnes d'hydrogène par seconde et ce qui produit 596 millions de tonnes d'hélium.
Cette différence de masse est convertie en énergie par rayonnement, produisant un rayonnement à l'origine de la chaleur et de la lumière.

À la fin de la vie de l'étoile il n'y a presque plus d'hydrogène les atomes qui fusionnent sont de plus en plus lourds : 3 He ->C, C+He-> O,C+C-> MG ou Na, , O+O->Si, MG, P...
Mais ces réactions de fusion consomment alors plus d'énergie. Lorsque l'équilibre entre énergie nécessaire à la fusion et énergie produite par la fusion s'inverse, l'étoile arrête de fusionner et implose. Selon les caractéristiques de l'étoile (sa masse surtout), elle sera capable de produire des atomes plus ou moins lourds à la fin de sa vie. Notre soleil s'arrêtera au carbone. À la mort des étoiles, ces atomes plus lourds vont enrichir l'espace interstellaire et permettre l'existence des planètes.
Notre soleil fusionne l'hydrogène depuis 5 milliards d'années et devrait continuer encore 5 milliards

d'années.

B/ Conditions et mécanismes intimes de la fusion et libération d'énergie.
-conditions de température et pression
Des conditions de température et de pression sont d'abord nécessaires pour que la fusion soit possible. En effet une température de 10 millions de degrés est nécessaire, dans le soleil elle est de 100 millions et la pression égale 200 milliards. Au début de la vie de l'étoile, le gaz est chauffé par la pression : Sous l'effet de sa masse et de la gravité, le gaz s'effondre créant une pression très élevée, qui va le chauffer. Arrivé à une température suffisante, l'hydrogène va commencer à fusionner. La pression et la température seront maintenues par la gravité et l'énergie libérée par la fusion qui ainsi s'auto-entretient.

-mécanisme, plasma et 4ème état de la matière:
dans ces conditions, le gaz entre alors dans le 4ème état de la matière ou plasma. La structure noyau-électron se dissocie, l'électron devient libre et le noyau positif, le gaz est « ionisé ».
Il acquière alors des propriétés très différentes et notamment la conductivité électrique et la sensibilité aux champs magnétiques.
l'Hydrogène : à l'état gazeux normal, il est composé d'un seul proton et un électron, c'est le protium. Il possède deux isotopes : le deutérium, avec un proton, un neutron et un électron ; et le tritium avec un proton, deux neutrons et un électron.
L'hélium : il est composé de deux protons, deux neutrons et deux électrons.

Dans le plasma solaire les protons de l'hydrogène sont libres et une collision entre deux protons va produire du deutérium, de l'hélium 3, de l'hélium, des neutrons, des rayonnements B-

-quantification de l'énergie
prenons la réaction : 4H->He +E
si on prend une masse d'hydrogène d'1kg, on produit 993,15g d'hélium
il manque 6,85 g.
cette masse est transformée en énergie selon la formule
E=mC2 = 6,85.10-3 x 3,108carré= 6,2,1014 joules
c'est aussi l'énergie libérée par la combustion de 20 000 tonnes de charbon

À l'échelle du soleil chaque seconde constitue ainsi une perte de masse de 4 millions de tonnes, et une production de 1,2.1044 J. Sur 10 milliards d'années il n'aura cependant perdu qu'un millième de sa masse.

2 Projet ITER
A/ Historique et contexte
ITER, en latin le chemin, est un des projets les plus prometteurs concernant l'énergie du futur. Actuellement nos sources d'énergie sont les fossiles (pétrole et charbon), les renouvelables (éoliennes et solaire), et la fission nucléaire. Toutes présentent des inconvénients non négligeables : épuisable, faible rendement, dangerosité..etc
Les recherches se sont orientées vers la fusion nucléaire car il semble qu'elle pourrait ne présenter aucun de ces problèmes. Mais reproduire la fusion nucléaire est un défi technologique majeur et le projet se déploie sur des décennies.
La fusion nucléaire a déjà été utilisée pour produire la bombe à hydrogène ou bombe H. C'est une bombe en deux compartiments : l'un renferme une bombe A utilisant la fission du Plutonium ou de l'uranium ; Le deuxième compartiment renferme des isotopes de l'hydrogène. L'explosion de la première génère une température de10_8 Kelvin, et crée les conditions de la fusion.
Ces bombes ont été testées et dégagent 1000 x plus d'énergie que les bombes atomiques à fission.

Dans ce contexte l'énergie est une explosion, et si la fusion est produite, son énergie n'est pas récupérable.
Le projet ITER a pour objectif de produire et maitriser la production de plasma pour permettre la fusion. C'est donc la première étape de la production d'énergie.

B/ Conception du TOKAMAK et contraintes thermo dynamiques

Le tokamak est la machine de production du plasma. Le premier modèle russe date de 1960. Son rôle est de porter la matière à plus de 150 millions de degrés un mélange de deutérium et de tritium. Celui d'ITER est le plus grand jamais conçu et il devrait contenir 830 mètres cubes de plasma.

Pour obtenir du plasma, il faut tendre à des conditions de température et de pression extrêmes, mobilisant les connaissances en thermodynamique et en les adaptant à des conditions extrêmes.
Il faut :

- obtenir de très hauts niveaux de pression et température,
- utiliser le moins d'énergie possible pour que le rendement soit positif (que le fonctionnement de la machine consomme moins d'énergie qu'elle ne produit) : il faut que sa capacité thermique soit plus faible que l'énergie libérée
- Utiliser des techniques et matériaux résistants à ces conditions et utilisables pour le transfert thermique pour la conversion de l'énergie.

Pour atteindre ces objectifs, on produit le plasma dans une zone confinée : d'une part pour atteindre de très hauts niveaux de pression
Il existe pour l'heure deux types de confinement
- le confinement inertiel : de très petite quantités de matière sont enfermées dans une capsule de quelques mm, et qui est enfermée dans une cellule sphérique close, bombardée par des rayons laser et comprimée jusqu'à explosion
-le confinement magnétique : utilisé dans le tokamak d'ITER
Le Tokamak est une machine en forme d'anneau métallique creux (tore).
Il produit un confinement magnétique qui crée une barrière immatérielle. Ce champ magnétique est créé par des bobines supra magnétiques installées autour de la chambre et par un courant électrique qui le traverse.
Ce champ magnétique chauffe le gaz d'hydrogène mais insuffisamment pour atteindre la fusion : 10millions de degrés atteints par l'effet joule.
On a donc recours à des systèmes externes : injection de particules neutres, ondes radio-fréquences.
Une fois le plasma créé, l'énergie fournie par la fusion est suffisante pour entretenir la température.
Le record de température obtenue dans un tokamak est de 500 millions de degrés (tokamak JET au royaume uni).

La fusion se tient donc à distance de la paroi puisqu'elle est confinée dans le champ magnétique, et les parois sont bombardées par les neutrons chargés en énergie issus de cette fusion.
La deuxième étape consistera à recueillir l'énergie transférée par neutrons aux parois pour produire de la vapeur et générer et stocker de l'électricité, par transfert thermique

C/ performances obtenues et rendement énergétique
1/Une des problématiques est d'obtenir une énergie supérieure à l'énergie consommée pour l'obtention du plasma. L'objectif d'ITER est de produire 500 MW pour des périodes de 400 à 600 secondes à partir d'un apport de 50 MW.
Ce rendement appelé facteur d'amplification est appelé Q. L'objectif est $Q>10$. Le $Q=1$ est appelé breakeven. L'ignition est la configuration où la fusion entretient complètement le plasma et permet de suspendre les autres systèmes de chauffage : ici Q= infini

2/Une centrale à charbon de 1000 MW brûle 2,7 millions de tonnes de charbon. Une centrale à fusion équivalente ne consommera que 250 kg d'hydrogène.
A masse égale de substrat, la fusion produit 4 fois plus d'énergie de la fission, et 4 millions de fois plus que la combustion du charbon ou du pétrole

D/ avantages de cette nouvelle énergie

- sûreté : pas de risque de fusion du cœur, en cas de dysfonctionnement, le plasma refroidit et les réactions s'arrêtent.
- absence de déchets : aucune production de co2 ni gaz à effet de serre. Le déchet principal est l'hélium gaz inerte inoffensif
  les parois bombardées de neutrons seront radioactives mais pour une durée de cent ans.
- combustibles très disponibles :
  le deutérium est abondant dans la nature : 33 grammes par mètre cube d'eau, qu'il suffit de distiller.
  Le tritium s'obtient par interaction entre neutrons et lithium. Le lithium est abondant dans le croute terrestre et l'eau de mer ; il est estimé qu'il en existe assez pour couvrir les besoins sur 6 millions d'années. Itern

Difficulté de la technologie
cout 20 milliards d'euros ont déjà été investis

Conclusion : Ce projet ITER s'annonce comme étant la future étape de la fusion et a pour but de démontrer (ou non) la faisabilité scientifique de la fusion nucléaire contrôlée par confinement magnétique pour produire de l'énergie.
De nombreuses problématiques sont soulevées et mettent les scientifiques devant de grands défis : optimiser le rendement énergétique, développer des structures et matériaux compatibles et exploitables, adapter nos connaissances terrestres en thermodynamiques pour les associer avec ces conditions extrêmes.